

УДК 669.017:519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.281221.7.820

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДИКИ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ СТАЛІ СТ3ГПС

АБАКУМОВА К. А., *бакалавр*Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. + 38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@gmail.com

Анотація. Вступ. Маловуглецеві низьколеговані сталі знайшли широке застосування в будівництві. Тому, незважаючи на наявність значної кількості методик та способів оцінювання їх критеріїв якості, актуальною бачиться задача оперативного прогнозу цих критеріїв. Труднощі у прогнозуванні критеріїв якості металопродукції зі сталей криються в складності технології їх виробництва. У разі відхилення параметрів технології за рамки нормативних документів властивості матеріалу можуть значно різнитися. У зв'язку із цим запропоновано для оцінювання межі міцності маловуглецевої сталі застосувати методику планування експериментів. **Матеріали та методика.** Досліджувались зразки сталі звичайної якості Ст3Гпс, виготовлені з круга діаметром 24 мм. Хімічний склад сталі та її показники міцності змінювалися в межах нормативних документів згідно з ГОСТ 380 та ДСТУ 2651. У стані заводської поставки структура сталі була феритно-перлітною. Вміст перлітної складової залежно від кількості вуглецю в сталі коливався від 11,2 до 17,6 %, решту складав ферит. **Результати експерименту.** На першому етапі досліджень проводився аналіз впливу кожного хімічного елемента сталі на межу її міцності. З цією метою за допомогою програми «Експерт», реалізованої на ЕОМ, отримано однофакторні моделі прогнозу міцності. На другому етапі досліджень шляхом реалізації матриці планування експериментів за допомогою методики дробових реплік кількість її рядків була зменшена з 32 до 16. Такий підхід суттєво скорочує витрати на проведення експериментів. Отримана багатофакторна (X1...X5) модель прогнозу межі міцності сталі Ст3Гпс адекватна критеріям Фішера та Кохрена. За критерієм Фішера коефіцієнт збіжності результатів становив 1,029 за критичного значення 2,400. Модель також адекватна згідно з критерієм Кохрена 0,335 за критичного значення 0,547. На третьому етапі досліджень, за результатами аналізу коефіцієнтів багатопараметричної моделі побудовано гістограми комплексної оцінки впливу елементів хімічного складу на міцність сталі. **Висновки.** Для сталі Ст3Гпс отримано адекватну модель прогнозу її міцності та гістограми впливу на неї хімічного складу. Отримані результати має сенс застосовувати для оперативного прогнозу міцності маловуглецевих сталей у стані заводської поставки.

Ключові слова: *сталь Ст3Гпс; хімічний склад; міцність; структура; прогнозування; рівняння регресії*

APPLICATION OF EXPERIMENTAL PLANNING METHODS IN EVALUATION OF ST3GP STEEL QUALITY ASSESSMENT

АБАКУМОВА К.А., *bachelor*Department of Materials Science, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. + 38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@gmail.com

Abstract. Introduction. Low-carbon low-alloy steels are widely used in construction. Therefore, despite the existence of a significant number of methods and ways to assess their quality criteria, the task of operational forecasting of these criteria is urgent. Difficulties in predicting the quality criteria of metal products from steels lie in the complexity of the technology of their production. If the parameters of the technology deviate from the normative documents, the properties of the material can differ significantly. In this regard, it is proposed to apply the method of experimental planning to estimate the tensile strength of low-carbon steel. **Materials and methods.** Samples of steel of ordinary quality Ст3Гпс made of a circle with a diameter of 24 mm were studied. The chemical composition of steel and its strength indicators varied within the normative documents in accordance with ГОСТ 380 and ДСТУ 2651. In the state of factory supply, the steel structure was ferritic-pearlitic. The content of the pearlite component, depending on the amount of carbon in the steel ranged from 11,2 to 17,6 %, the remaining fraction fell to ferrite. **The results of the experiment.** At the first stage of research the analysis of influence of each chemical element of steel on limit of its durability was carried out. To this end, with the help of the program "Expert", implemented on a computer, obtained one-factor models of strength forecast. In the second stage of research, the number of rows was reduced from 32 to 16 by implementing the matrix of experimental planning using the technique of small replicas. This approach significantly

reduces the cost of experiments. The obtained multifactor ($X_1...X_5$) model for predicting the strength limit of steel St3Gps is adequate according to Fisher's and Cochren's criteria. According to Fisher's criterion, the coefficient of convergence of the results was 1,029 with a critical value of 2,400. The model is also adequate according to the Cochren test of 0,335 with a critical value of 0,547. At the third stage of research, based on the results of the analysis of the coefficients of the multiparameter model, histograms of complex assessment of the influence of chemical composition elements on the strength of steel are constructed. **Conclusions.** An adequate model for predicting its strength and histograms of the effect of its chemical composition on Ст3Гпс Steel was obtained. It makes sense to use the obtained results for the operational forecast of the strength of low-carbon steels in the state of factory delivery.

Keywords: steel Cm3Гпс; chemical composition; strength; structure; prediction; regression equation

Вступ. Для оцінювання властивостей маловуглецевих низьколегованих сталей застосовують різні підходи, включаючи також методи неруйнівного контролю [1–4]. При цьому потрібно враховувати велику кількість технологічних чинників, що значною впливають на їх службові властивості, до яких у першу чергу можна віднести і механічні характеристики. Доволі часто в металознавстві результати прогнозу тієї чи іншої характеристики якості не завжди повною мірою відображають результати експерименту, що пов'язано багато в чому зі складністю технології їх виробництва [5; 6]. При цьому багато технологічних чинників визначають характеристики якості матеріалів [7–12].

Наразі активно застосовуються для прогнозу критеріїв якості металевих виробів та моделювання технологічних процесів різні підходи, включаючи математичні методики [13–16]. Серед математичних перспективних методів прогнозування якості матеріалів, виготовлених з використанням багатопараметричних технологій, можна відмітити фрактальні способи моделювання структури та властивостей матеріалів [17–27]. Ці фрактальні підходи базуються на проміжній асимптотиці із використанням нецілочислової розмірності, що підвищує точність ідентифікації структурних складових та точність прогнозу моделей «структура–властивості». Крім того, застосовуються методи з використанням експертних оцінок [28; 29], модифіковані підходи до оцінювання областей компромісу металів [31–33]. Один із апробованих із практичною метою підходів прогнозу якості матеріалів – використання різноманітних методик планування експериментів [34–36].

Для прогнозу межі міцності на розтяг маловуглецевої низьколегованої сталі Ст3Гпс у дослідженні застосовано методику планування експериментів з аналізом впливу кожного елемента її хімічного складу на обраний критерій якості.

Матеріали та методика. Досліджувана марка сталі Ст3Гпс з умістом Mn близько 1 % належить до конструкційних вуглецевих сталей звичайної якості відповідно до нормативних документів (ГОСТ 380 і ДСТУ 2651).

Низьковуглецева сталь Ст3Гпс застосовується в несних елементах зварних конструкцій, які можуть експлуатуватися за змінних навантажень у робочому інтервалі температур від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до майже $425\text{ }^{\circ}\text{C}$.

У рамках вищезазначених нормативних документів хімічний склад сталі Ст3Гпс змінюється в діапазоні значень, що наводяться в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад сталі Ст3Гпс (%)

C	Mn	Si	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As
0,14...0,22	0,8...1,1	0,11...0,15	0,1...0,3	0,01...0,05	до 0,04	до 0,3	до 0,01	до 0,3	до 0,08

Межа міцності на розтяг σ_B оцінювалась на основі даних традиційних натурних експериментів (механічних іспитів).

Для вивчення шліфів на мікроскопічному рівні подання структури сталі в стані заводської поставки використано мікроскоп німецького виробництва Неофот марки 2. Для виявлення елементів структури шліфи металу проходили травлення в 4 % розчині азотної кислоти у спирті після

технологічних операцій шліфування та полірування.

У стані заводської поставки структура сталі складалася з фериту та перліту (рис. 1) [37]. Вміст перліту залежно від кількості

вуглецю в сталі коливався в межах від 11,2 до 17,6 %, решту склав ферит. На рисунку 1 наведено феритно-перлітну структуру зразків сталі, виготовлених із круга діаметром 24 мм.

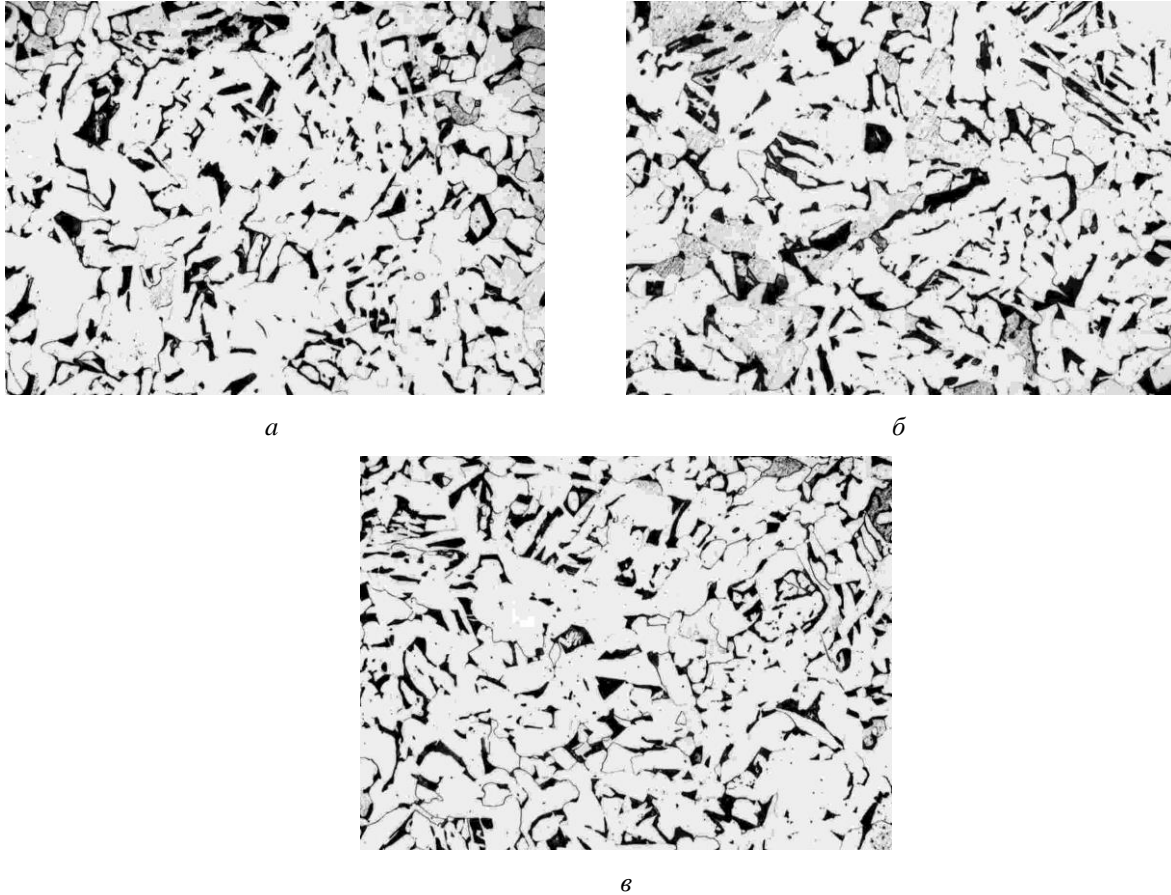


Рис. 1. Мікроструктура сталі Ст3Гпс у стані заводської поставки при 0,15 % С, $\times 100$

В дослідженні застосовувалися результати 16 натурних експериментів для вивчення впливу елементів хімічного складу на міцність сталі марки Ст3Гпс у стані заводської поставки.

Результати експерименту. З використанням розробленої на ЕОМ проф. Ю. І. Дубровим, програмістом Ф. В. Криулїним та проф. В. М. Волчуком програми «Експерт» у середовищі *Delphi* проведено аналіз впливу елементів хімічного складу сталі Ст3Гпс на її міцність. Отримані (рис. 2) результати у вигляді лінійних залежностей та однофакторних рівнянь типу $Y(X)$ збігаються з теоретичними поясненнями згідно з

висновками фундаментальних вітчизняних та закордонних праць, наприклад, [1; 2].

Ці результати впливу елементів хімічного складу допомогли у побудові матриці планування експериментів враховувати адекватність розрахованих числових показників межі міцності сталі на розтяг з теоретичним трактуванням такого впливу. На рисунку 2 (а-д) залежності, показані червоним кольором, описують експертну оцінку, а зеленим – результати прогнозу за наведеними на цих рисунках моделями. Порівняльна характеристика експертних та модельних залежностей, що описують межу міцності на розтяг, свідчить про їх близький збіг.

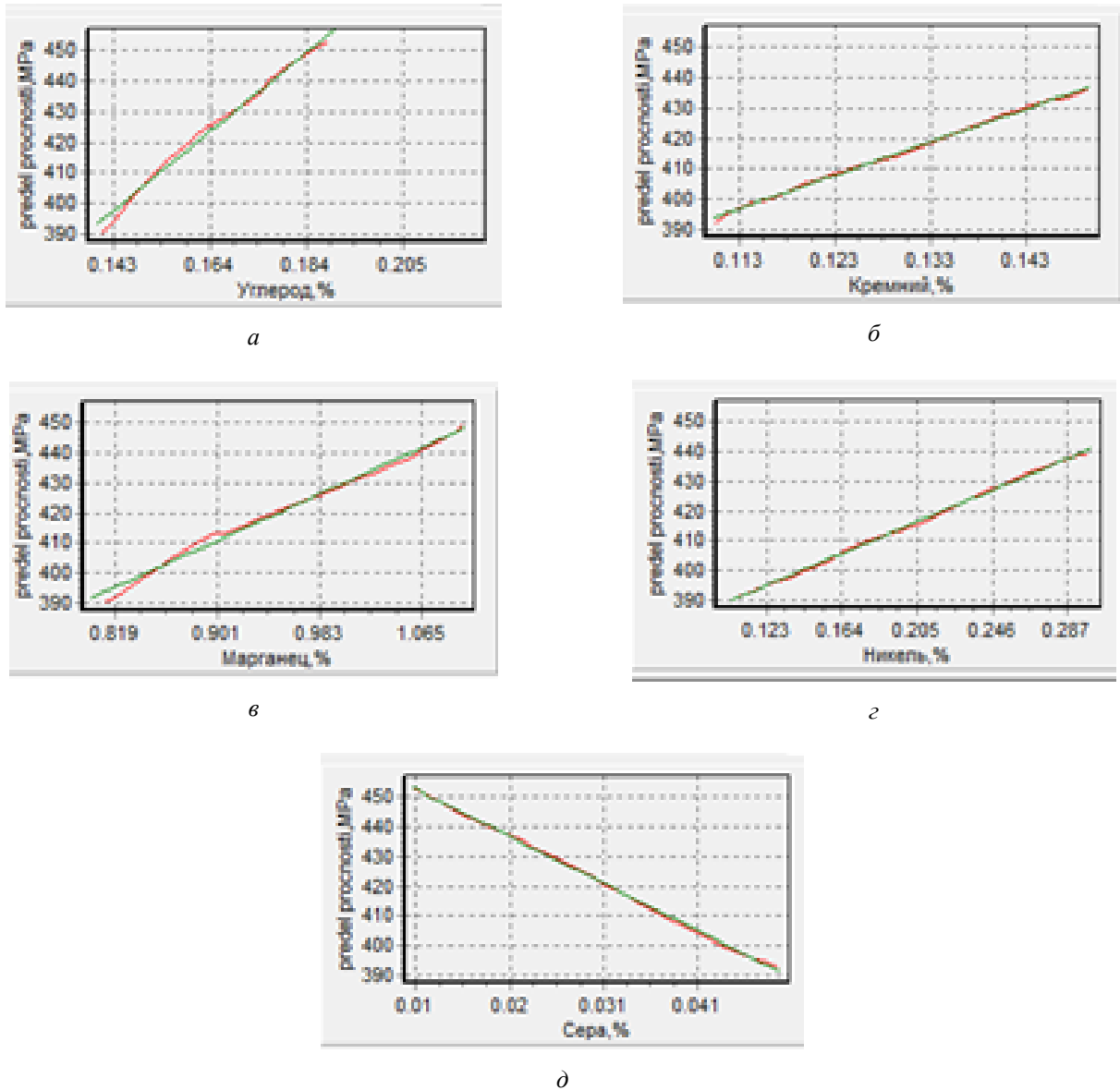


Рис. 2. Залежність межі міцності сталі Ст3Гпс від впливу елементів хімічного складу

Для побудови матриці планування експериментів застосовували дробову репліку, що дозволило оптимізувати час та кошти на її реалізацію. Замість $2^5 = 32$ рядків згідно з кількістю залежних змінних – елементів хімічного складу (аргументів), в матриці використано $2^4 = 16$ рядків.

У матриці планування експериментів U_m та $U_{розр}$ – експериментальні та розрахункові значення функції мети (межі міцності на розтяг) (табл. 2). У таблиці 2 скорочення означають: ОУ – загальний рівень значень залежних змінних X_1-X_5 (С, Мп, Si, Ni, S), ВР та НР – верхні «+» та нижні «-» значення залежних змінних

відповідно, ІВ – інтервал варіювання \pm залежних змінних.

Коефіцієнти моделі розраховувалися за такими формулами:

$$b_0 = \frac{\sum Y_T}{16};$$

$$b_1 = \frac{\sum_1^8 Y_T - \sum_9^{16} Y_T}{16};$$

$$b_2 = \frac{\sum_1^4 Y_T - \sum_5^8 Y_T + \sum_9^{12} Y_T - \sum_{13}^{16} Y_T}{16};$$

$$b_3 = \frac{\sum_1^2 Y_T - \sum_3^4 Y_T + \sum_5^6 Y_T - \sum_7^8 Y_T + \sum_9^{10} Y_T}{16} =$$

$$= \frac{-\sum_{11}^{12} Y_T + \sum_{13}^{14} Y_T - \sum_{15}^{16} Y_T}{16};$$

$$b_4 =$$

$$\frac{Y_{\tau 1} - Y_{\tau 2} + Y_{\tau 3} - Y_{\tau 4} + Y_{\tau 5} - Y_{\tau 6} + Y_{\tau 7} - Y_{\tau 8} + Y_{\tau 9} - Y_{\tau 10} +}{16} =$$

$$= \frac{+Y_{\tau 11} - Y_{\tau 12} + Y_{\tau 13} - Y_{\tau 14} + Y_{\tau 15} - Y_{\tau 16}}{16}$$

$$b_5 = \frac{-Y_{\tau 1} + Y_{\tau 2} - Y_{\tau 3} + Y_{\tau 4} - Y_{\tau 5} + Y_{\tau 6} - Y_{\tau 7} + Y_{\tau 8} -}{16}$$

$$\frac{-Y_{\tau 9} + Y_{\tau 10} - Y_{\tau 11} + Y_{\tau 12} - Y_{\tau 13} + Y_{\tau 14} - Y_{\tau 15} + Y_{\tau 16}}{16}$$

Таблиця 2

Матриця планування

ОУ		0,18	0,95	0,13	0,20	0,03		
ІВ		0,04	0,3	0,02	0,10	0,02		
ВР		0,22	1,1	0,15	0,30	0,05		
НР		0,14	0,8	0,11	0,10	0,01		
Змінні		С	<u>Mn</u>	Si	Ni	S		
№ експерименту	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	У _τ	У _{розр}
1	+	+	+	+	+	-	480	483
2	+	+	+	+	-	+	474	469
3	+	+	+	-	+	-	465	458
4	+	+	+	-	-	+	458	454
5	+	+	-	+	+	-	450	454
6	+	+	-	+	-	+	443	440
7	+	+	-	-	+	-	435	439
8	+	+	-	-	-	+	426	425
9	+	-	+	+	+	-	418	422
10	+	-	+	+	-	+	410	408
11	+	-	+	-	+	-	402	407
12	+	-	+	-	-	+	396	393
13	+	-	-	+	+	-	390	393
14	+	-	-	+	-	+	383	379
15	+	-	-	-	+	-	376	378
16	+	-	-	-	-	+	370	364

Обчислення показників функції мети U здійснювалося по 16 рядках матриці згідно з наведеними нижче формулами та внесено до таблиці 2 у стовпчик $U_{розр}$.

$$U_{розр1} = 424 - 54 \cdot 0,22 - 14 \cdot 1,1 - 8 \cdot 0,15 - 4 \cdot 0,3 - 4 \cdot 0,01;$$

$$U_{розр2} = 424 - 54 \cdot 0,22 - 14 \cdot 1,1 - 8 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,05;$$

$$U_{розр3} = 424 - 54 \cdot 0,22 - 14 \cdot 1,1 + 8 \cdot 0,11 - 4 \cdot 0,3 - 4 \cdot 0,01;$$

$$U_{розр4} = 424 - 54 \cdot 0,22 - 14 \cdot 1,1 + 8 \cdot 0,11 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,05;$$

$$U_{розр5} = 424 - 54 \cdot 0,22 + 14 \cdot 0,8 - 8 \cdot 0,15 - 4 \cdot 0,3 - 4 \cdot 0,01;$$

$$U_{розр6} = 424 - 54 \cdot 0,22 + 14 \cdot 0,8 - 8 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,05;$$

$$U_{розр7} = 424 - 54 \cdot 0,22 + 14 \cdot 0,8 + 8 \cdot 0,11 - 4 \cdot 0,3 - 4 \cdot 0,01;$$

$$U_{розр8} = 424 - 54 \cdot 0,22 + 14 \cdot 0,8 + 8 \cdot 0,11 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,05;$$

$$U_{розр9} = 424 + 54 \cdot 0,14 - 14 \cdot 1,1 - 8 \cdot 0,15 - 4 \cdot 0,3 - 4 \cdot 0,01;$$

$$U_{розр10} = 424 + 54 \cdot 0,14 - 14 \cdot 1,1 - 8 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,05;$$

$$U_{розр11} = 424 + 54 \cdot 0,14 - 14 \cdot 1,1 + 8 \cdot 0,11 - 4 \cdot 0,3 - 4 \cdot 0,01;$$

$$U_{розр12} = 424 + 54 \cdot 0,14 - 14 \cdot 1,1 + 8 \cdot 0,11 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,05;$$

$$U_{розр13} = 424 + 54 \cdot 0,14 + 14 \cdot 0,5 - 8 \cdot 0,15 - 4 \cdot 0,3 - 4 \cdot 0,01;$$

$$U_{розр14} = 424 + 54 \cdot 0,14 + 14 \cdot 0,5 - 8 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,05;$$

$$U_{розр15} = 424 + 54 \cdot 0,14 + 14 \cdot 0,5 + 8 \cdot 0,11 - 4 \cdot 0,3 - 4 \cdot 0,01;$$

$$U_{розр16} = 424 + 54 \cdot 0,14 + 14 \cdot 0,5 + 8 \cdot 0,11 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,05.$$

$$U_{розр} = b_0 \pm b_1X_1 \pm b_2X_2 \pm b_3X_3 \pm b_4X_4 \pm b_5X_5 = 423,500 \cdot X_0 + 30,375 \cdot X_1 + 14,375 \cdot X_2 + 7,500 \cdot X_3 + 3,500 \cdot X_4 - 3,500 \cdot X_5, \quad (1)$$

$$U_{розр} = b_0 \pm b_1X_1 \pm b_2X_2 \pm b_3X_3 \pm b_4X_4 \pm b_5X_5 = 145,271 \cdot X_0 + 759,375 \cdot X_1 + 95,833 \cdot X_2 + 375,000 \cdot X_3 + 35,000 \cdot X_4 - 175,000 \cdot X_5. \quad (2)$$

Модель (2) адекватна згідно з критерієм Фішера 1,029 за критичного значення 2,400. Модель (2) також адекватна згідно з критерієм Кохрена 0,335 за критичного значення 0,547.

Вид функції прогнозу межі міцності на розтяг у межах значень експерименту в нормалізованій формі наведено у формулі (1), у стандартизованій формі, що застосовувалася для подальших розрахунків – у формулі (2).

Гістограма впливу елементів хімічного складу на міцність побудована на основі аналізу коефіцієнтів $b_0 \dots b_5$ рівняння (2) та наведена на рисунку 3.

У процентному співвідношенні гістограма, наведена на рисунку 3, мала такий вигляд (рис. 4).

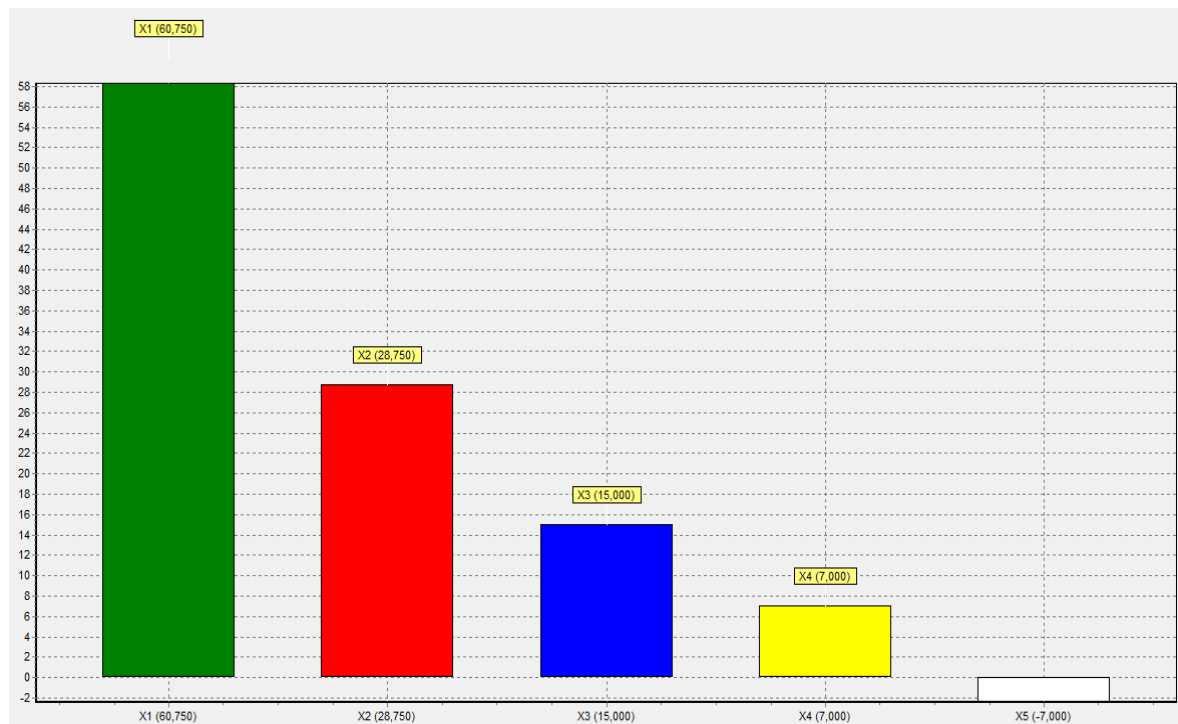


Рис. 3. Гістограма впливу елементів хімічного складу на межу міцності

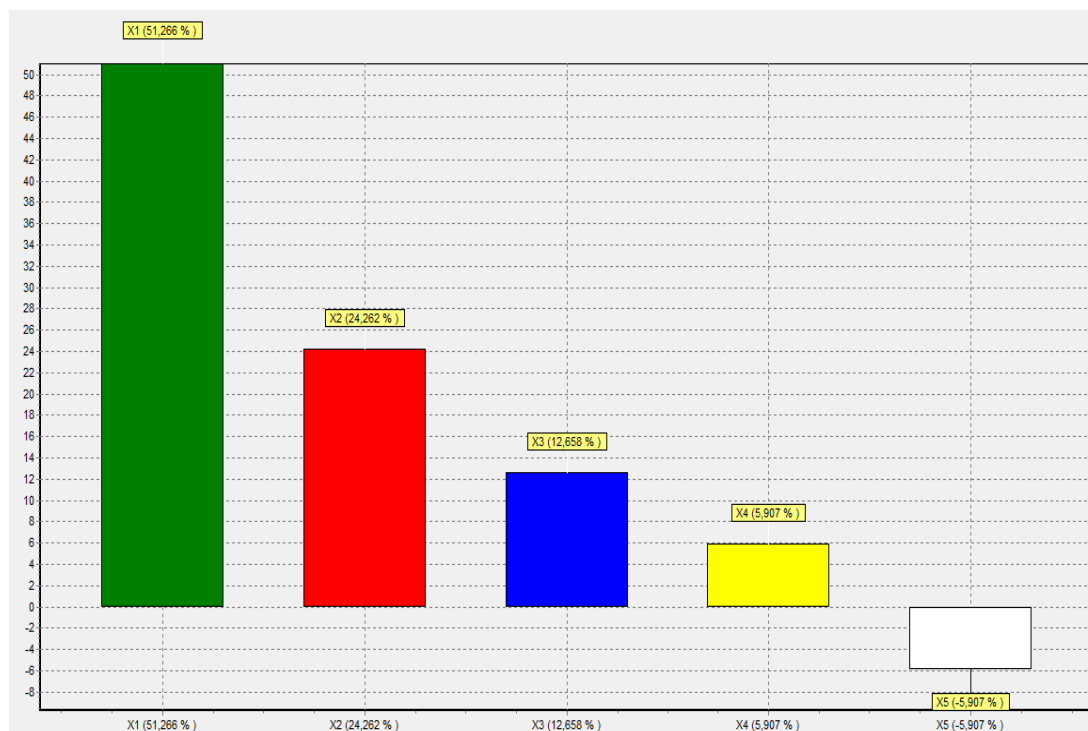


Рис. 4. Гістограма впливу елементів хімічного складу на межу міцності в процентному співвідношенні

Як показав аналіз гістограм на рисунках 3 і 4, вони однаковою мірою відображають «вагу» елементів вуглецю, марганцю, кремнію, нікелю та сірки на міцність сталі СтЗГпс та можуть бути використані для експертного аналізу механічних властивостей маловуглецевих низьколегованих сталей звичайної якості.

Висновки. Наведено результати досліджень впливу хімічного складу сталі

СтЗГпс на межу міцності на розтяг у стані заводської поставки. Із застосуванням методики планування експериментів сформовано матрицю планування та розраховано модель прогнозу показників міцності (2), що адекватна критеріям Фішера та Кохрена. Отримані результати можна застосовувати для оперативного прогнозу показників міцності металопрокату зі сталі СтЗГпс.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гуляев А. П. *Металловедение*. Москва : Металлургия, 1986. 542 с.
2. Berns H., Theisen W. *Ferrous materials : Steel and Cast Iron : monograph*. Berlin Heidelberg : Springer, 2008. 418 p.
3. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Идентификация многопараметрических, многокритериальных технологий и пути их практической реализации. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2013. № 4. С. 5–11.
4. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. О прогнозировании качества целевого продукта в периодических технологиях. *Доповіді НАН України*. 2014. № 11. С. 77–81. URL: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2014.11.0771>
5. Волчук В. Н. Исследования влияния химического состава чугуновых прокатных валков на их механические свойства. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. № 5. С. 12–18. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/40698>
6. Волчук В. Н. К определению области компромисса характеристик качества материалов. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2015. № 3. С. 21–25. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/23-30>
7. Дубров Ю., Большаков В., Волчук В. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий : монография. Саарбрюккен: Palmarium Academic Publishing, 2015. 236 с.
8. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Пути прогноза механических свойств прокатных валков. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2014. № 1. С. 19–40. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/19-40>

9. Bolshakov V. I., Volchuk V. M., Dubrov Yu. I. Regularization of One Conditionally Ill-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018. Vol. 40, № 9. Pp. 1165–1171. URL: DOI: 10.15407/mfint.40.09.1165
10. Большаков Вад. И., Большаков В. И., Волчук В. М., Дубров Ю. И. Системный анализ технологии производства массивного металлевого лиття. *Вісник НАН України*. 2015. № 9. С. 69–73. URL: <http://dx.doi.org/10.15407/visn2015.09.069>
11. Волчук В. М., Штанденко М. С. Математична модель прогнозу якості металу. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. № 2. С. 31–35. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.290818.31.87>
12. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Прогнозирование и управление качественными характеристиками прокатных валков. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. № 9. С. 9–14. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/42101>
13. Volchuk V., Klymenko I., Kroviakov S., Orešković M. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism. *Tehnički glasnik – Technical Journal*. 2018. Vol. 12, № 2. Pp. 93–97. URL: <https://doi.org/10.31803/tg-20180302115027>
14. Bol'shakov V., Volchuk V., Dubrov Yu. Fractals and properties of materials : monograph. Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2016. 140 p. URL: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>
15. Волчук В. М. Модель оцінювання твердості чавунних валків СІХН-43 та СІХНФ-47. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 4. С. 22–35. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.241219.22.597>
16. Bolshakov V. I., Volchuk V. M., Parhomenko O. F. Evaluation of High Strength Steel Fatigue. UDCS'19: Fourth International Iron and Steel Symposium, April 4-6, 2019, Karabuk University, Karabuk, Turkey. 2019. Vol. 4. Pp. 415–417. URL: <https://drive.google.com/open?id=1jfWwEhSuRl-3bGcv-dG7CzYnmMh7KcVT>
17. Волчук В. Н. Применение вейвлет-анализа для оценки зеренной структуры металлов. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2009. № 4. С. 24–32. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/23-30>
18. Volchuk V. M., Uzlov O. V., Puchikov O. V., Ivantsov S. V. Fractals Theory Application for Evaluation of Influence of Non Metallic inclusions on Mechanical Properties of S355J2 Steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021. Vol. 1021, № 1. Pp. 012053. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1021/1/012053/meta>
19. Kroviakov S., Volchuk V., Zavoloka M., Kryzhanovskyi V. Search for Ranking Approaches of Expanded Clay Concrete Quality Criteria. *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2019. Vol. 968. Pp. 20–25. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.20>
20. Volchuk V., Ivantsov S., Tiutieriev I., Fortyhin A. Search for the Evaluation of 'strength-plasticity' Relation in Constructional Steel. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 864. Pp. 211–216. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.211>
21. Kroviakov S., Volchuk V., Zavoloka M. Fractal Model of the Influence of Expanded Clay Concrete Macrostructure on its Strength. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 864. Pp. 43–52. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.43>
22. Volchuk V. M., Uzlov O. V., Puchikov O. V., Zotov D. S., Sokoliuk V. I. Fractal model of mechanical properties evaluation of C–Mn–Al–Ti–N steel with acicular ferrite structure for railway freight cars. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, 2021. Vol. 2389, №. 1. Pp. 080002. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0063496>
23. Vakhrusheva V. S., Volchuk V. M., Hruzyn N. V., Tiutieriev I. A. Fractal model of estimating quality of cold worked fuel cladding tubes. *Вопросы атомной науки и техники*. 2021. Vol. 135, № 5. Pp. 57–63. URL: <https://doi.org/10.46813/2021-135-057>
24. Volchuk V. M., Kotov M. A. Fractal express methods evaluation of a breaking stress of concrete. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021. Vol. 1926, №. 1. Pp. 012023. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1926/1/012023>
25. Bausk E. A., Volchuk V. M., Uzlov O. V. Remaining Service Life Evaluation of Nuclear Power Plants Construction Steel Elements. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 2021. Vol. 1926, №. 1. Pp. 012050. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1926/1/012050>
26. Волчук В. М. Аналіз балової мартенситної структури. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2020. № 4. С. 38–44. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.241120.38.689>
27. Volchuk V. M., Uzlov O. V., Puchikov O. V., Ivantsov S. V., Tiutieriev I. A. Fractal model of structure-properties effect of low carbon steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021. Vol. 1100, №. 1. Pp. 012034. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1100/1/012034/meta#references>
28. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дейнеко Л. Н., Дубров Ю. И. Композиция метода планирования экстремальных экспериментов и экспертной информации для формирования системы прогноза качества материалов. *Перспективные задачи инженерной науки*. Вып. 2. Под общ. ред. акад. МИА, д. т. н., проф. В. И. Большакова. Днепропетровск : GAUDEAMUS, 2001 С. 203–208.

29. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дейнеко Л. Н., Дубров Ю. И. Формирование модели прогноза качества материала, основанной на экспертной оценке и активном эксперименте. Компьютерное материаловедение и обеспечение качества : матер. к 45-му Междунар. сем. по моделированию и оптимизации композитов. Одесса : АстроПринт, 2006. С. 146–150.

30. Дубров Ю. И., Волчук В. Н., Большаков В. И. Применение экспертной информации при формировании активного эксперимента в материаловедении. Моделирование и оптимизация в материаловедении : матер. к 40-му междунар. сем. по моделированию и оптимизации композитов. Одесса : АстроПринт, 2001. С. 25–26.

31. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Определение области компромисса критериев качества чугуновых валков. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. № 11. С. 4–7.

32. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. К определению класса металла. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2016. № 1. С. 26–31. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/24-31/62203>

33. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Способ определения области компромисса критериев качества многокритериальных технологий : твір наукового характеру. Свідцтво про реєстрацію автор. права на твір № 53769; дата реєстрації автор. права 18.02.2014.

34. Kroviakov S., Zavoloka M., Dudnik L. and Kryzhanovskyi V. Comparison of strength and durability of concretes made with sulfate-resistant portland cement and portland cement with pozzolana additive. *Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS*. 2019. Vol. 10, № 19. Pp. 81–86. URL: <https://doi.org/10.13167/2019.19.8>

35. Lyashenko T., Voznesensky V., Krovnyakov S. Analysis of water effect on fracture toughness in cement-based composites using computational materials science methods. *International symposium on brittle matrix composites*. 2000. Pp. 210–219. URL: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=1141801>

36. Volchuk V. M., Parhomenko O. F. Fractal approach in assessing the quality of steel 20. Innovative Lifecycle Technologies of Housing, Industrial and Transportation Objects : collective monograph, under the general editorship Savvitskiy M. Dnipro : Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture; Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava. 2018. Pp. 48–53. URL: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/1380>

37. Волчук В. Н. Разработка и исследование метода определения качественных характеристик металла на основе анализа фрактальной размерности его микроструктуры : дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.02.01. Днепропетровск, 2003. 186 с.

REFERENCES

- Gulyayev A.P. *Metallovedeniye* [Metallography]. Moscow: Metallurgy Publ., 1986, 542 p. (in Russian).
- Berns H. and Theisen W. *Ferrous materials : Steel and Cast Iron*. Berlin Heidelberg : Springer, 2008, 418 p.
- Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Identifikatsiya mnogoparametricheskikh, mnogokriterial'nykh tekhnologiy i puti ikh prakticheskoy realizatsii* [Multiparameter identification, multicriteria techniques and ways of their implementation]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2013, no. 4, pp. 5–11. (in Russian).
- Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O prognozirovanii kachestva tselevogo produkta v periodicheskikh tekhnologiyakh* [Predicting the quality of a desired product in periodic technologies]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2014, no. 11, pp. 77–81. (in Russian).
- Volchuk V.N. *Issledovaniya vliyaniya khimicheskogo sostava chugunnykh prokatnykh valkov na ikh mekhanicheskiye svoystva* [Studies of the influence of the chemical composition of cast iron rolls on their mechanical properties]. *Visnyk Prydniprovskoy derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 5, pp. 12–18. (in Russian).
- Volchuk V.N. *K opredeleniyu oblasti kompromissa kharakteristik kachestva materialov* [By identifying areas compromise performance materials quality]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2015, no. 3, pp. 21–25. (in Russian).
- Dubrov Yu., Bolshakov V. and Volchuk V. *Puti identifikatsii periodicheskikh mnogokriterial'nykh tekhnologiy* [Road periodic identification of multi-criteria Technology]. Saarbrucken : Palmarium Academic Publishing, 2015, 236 p. (in Russian).
- Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Puti prognoza mekhanicheskikh svoystv prokatnykh valkov* [Ways to forecast the mechanical properties of the rolls]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 1, pp. 19–40. (in Russian).
- Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. Regularization of One Conditionally ill-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018, vol. 40, no. 9, pp. 1165–1171.
- Bol'shakov Vad.I., Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Systemnyy analiz tekhnolohiyi vyrobnytstva masyvnoho metalevoho lyttya* [System analysis techniques of producing solid metal castings]. *Visnyk*

Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrainy [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2015, no. 9, pp. 69–73. (in Ukrainian).

11. Volchuk V.M. and Shtandenko M.S. *Matematychna model prohnozu yakosti metalu* [Mathematical model of the metal quality forecast]. *Visnyk Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2018, no. 2, pp. 31–35. (in Ukrainian).

12. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Prognozirovaniye i upravleniye kachestvennyimi kharakteristikami prokatnykh valkov* [Prediction and control of quality characteristics rolls]. *Visnyk Prydniprov's'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 9, pp. 9–14. (in Russian).

13. Volchuk V., Klymenko I., Kroviakov S. and Orešković M. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism. *Tehnički glasnik – Technical Journal*. 2018, vol. 12, no. 2, pp. 93–97.

14. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.

15. Volchuk V.M. *Model' otsinyuvannya tverdosti chavunnykh valkiv CIIXH-43 ta CIIXHΦ-47* [Model of assessment of the hardness of the iron rollers CIIXH-43 and CIIXHΦ-47]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 3, pp. 12–19. (in Russian).

16. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Parhomenko O.F. Evaluation of High Strength Steel Fatigue. UDCS'19: Fourth International Iron and Steel Symposium, April 4–6, 2019, Karabuk University, Karabuk, Turkey, 2019, vol. 4, pp. 415–417.

17. Volchuk V.N. *Primeneniye veyvlet-analiza dlya otsenki zerennoy struktury metallov* [The use of wavelet analysis to assess the grain structure of metals]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2009, no. 4, pp. 24–32. (in Russian).

18. Volchuk V.M., Uzlov O.V., Puchikov O.V. and Ivantsov S.V. Fractals Theory Application for Evaluation of Influence of Non Metallic inclusions on Mechanical Properties of S355J2 Steel. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021, vol. 1021, no. 1, pp. 012053.

19. Kroviakov S., Volchuk V., Zavaloka M. and Kryzhanovskiy V. Search for Ranking Approaches of Expanded Clay Concrete Quality Criteria. In: *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2019, vol. 968, pp. 20–25.

20. Volchuk V., Ivantsov S., Tiutieriev I. and Fortyhin A. Search for the Evaluation of 'strength-plasticity' Relation in Constructional Steel. *Key Engineering Materials*. 2020, vol. 864, pp. 211–216.

21. Kroviakov S., Volchuk V. and Zavaloka M. Fractal Model of the Influence of Expanded Clay Concrete Macrostructure on its Strength. *Key Engineering Materials*. 2020, vol. 864, pp. 43–52.

22. Volchuk V.M., Uzlov O.V., Puchikov O.V., Zotov D.S. and Sokoliuk V.I. Fractal model of mechanical properties evaluation of C–Mn–Al–Ti–N steel with acicular ferrite structure for railway freight cars. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, 2021, vol. 2389, no. 1, pp. 080002.

23. Vakhrusheva V.S., Volchuk V.M., Hruzin N.V. and Tiutieriev I.A. Fractal model of estimating quality of cold worked fuel cladding tubes. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2021, vol. 135, no. 5, pp. 57–63.

24. Volchuk V.M. and Kotov M.A. Fractal express methods evaluation of a breaking stress of concrete. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021, vol. 1926, no. 1, pp. 012023.

25. Bausk Yev.A., Volchuk V.M. and Uzlov O.V. Remaining Service Life Evaluation of Nuclear Power Plants Construction Steel Elements. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021, vol. 1926, no. 1, pp. 012050.

26. Volchuk V.M. *Analiz balovoyi martensytnoyi struktury* [Analysis of the martensitic structure]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2020, no. 4, pp. 38–44. (in Ukrainian).

27. Volchuk V.M., Uzlov O.V., Puchikov O.V., Ivantsov S.V. and Tiutieriev I.A. Fractal model of structure-properties effect of low carbon steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021, vol. 1100, no. 1, pp. 012034.

28. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N., Deyneko L.N. and Dubrov Yu.I. *Kompozitsiya metoda planirovaniya ekstremal'nykh eksperimentov i ekspertnoy informatsii dlya formirovaniya sistemy prognoza kachestva materialov* [Composition of a method for planning extreme experiments and expert information for the formation of a material quality prediction system]. *Perspektivnyye zadachi inzhenernoy nauki* [Perspective Tasks of Engineering Science]. Dnipropetrovsk : GAUDEAMUS, 2001, vol. 2, pp. 203–208. (in Russian).

29. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N., Dubrov Yu.I. and Deyneko L.N. *Formirovanie modeli prognoza kachestva materiala, osnovannoy na `ekspertnoj ocenke i aktivnom `ekspertente* [Formation of a model for predicting the quality of a material based on expert judgment and an active experiment]. *Komp'yuternoe materialovedenie i obespechenie kachestva : mater. k 45-mu mezhdunar. sem. po modelirovaniyu i optimizacii kompozitov* [Computer Science and Quality Assurance : mater. to the 45th Intern. Sem. on modeling and optimization of composites]. Odessa : AstroPrint, 2006, pp. 146–150. (in Russian).

30. Dubrov Yu.I., Volchuk V.N. and Bol'shakov V.I. *Primeneniye ekspertnoy informatsii pri formirovanii aktivnogo eksperimenta v materialovedenii* [Application of expert information in the formation of an active experiment

in materials science]. *Modelirovaniye i optimizatsiya v materialovedenii : mater. k 40-mu mezhdunar. sem. po modelirovaniyu i optimizatsii kompozitov : mater. k 40-mu mezhdunar. sem. po modelirovaniyu i optimizatsii kompozitov* [The modeling and optimization in materials science : proc. of 40th Int. conf. on modeling and optimization of composites]. Odessa, 2001, pp. 25–26. (in Russian).

31. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Opredele niye oblasti kompromissa kriteriyev kachestva chugunnykh valkov* [Scoping compromise quality criteria of cast iron rolls]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'a State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 11, pp. 4–7. (in Russian).

32. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *K opredeleniyu klasya metalla* [To the definition of a class of metal]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metalliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2016, no. 1, pp. 26–31. (in Russian).

33. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Sposob opredeleniya oblasti kompromissa kriteriev kachestva mnogokriterial'nykh tekhnologiy: tvir naukovo go kharakteru* [The method for determining the area of compromise quality criteria of multi-criteria technologies : scientific essay]. *Svidotstvo pro reyestratsiyu avtor. prava na tvir № 53769; data reyestratsiyi avtor. prava 18.02.2014* [Certificate of registration author. rights to the work no. 53769; date of registration author rights 18.02.2014]. (in Russian).

34. Kroviakov S., Zavoloka M., Dudnik L. and Kryzhanovskiy V. Comparison of strength and durability of concretes made with sulfate-resistant portland cement and portland cement with pozzolana additive. *Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS*. 2019, vol. 10, no. 19, pp. 81–86.

35. Lyashenko T., Voznesensky V. and Krovyakov S. Analysis of water effect on fracture toughness in cement-based composites using computational materials science methods. *International symposium on brittle matrix composites*. 2000, pp. 210–219.

36. Volchuk V.M. and Parhomenko O.F. *Fractal approach in assessing the quality of steel 20*. *Innovative Lifecycle Technologies of Housing, Industrial and Transportation Objects : collective monograph, under the general editorship Savytskyi M.* Dnipro: SHEE “Prydniprovsk'a State Academy of Civil Engineering and Architecture”; Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2018, pp. 48–53.

37. Volchuk V.M. *Rozroblennia i doslidzhennia metodu vyznachennia yakisnykh kharakterystyk metalu na osnovi analizu fraktalnoi rozmirnosti yoho mikrostruktury : diss. na soisk. uchen. step. kand. tehn. nauk : 05.02.01* [Development and research of the method for determining the qualitative characteristics of a metal on the basis of an analysis of the fractal dimension of its microstructure : Candidate Dissertation for Technical Sciences (05.02.01 – Materials Science)]. Dnipropetrovsk, 2003, 186 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 30.11.2021.